编者按 随着高新技术的快速发展，以及为实现“双碳”目标而进行的能源转型，锂、钴、稀土、镓、铟等传统“小众”战略性关键矿产资源应用大幅提升，需求增速远高于传统基础矿产，而其全球开发进度与增速却逊于需求增速，全球资源竞争进一步加剧。美欧等国家不断出台应对措施，以保障其战略性矿产供应链安全。2021 年 11 月 18 日，中共中央政治局审议《国家安全战略（2021—2025 年）》，明确提出确保能源矿产安全，首次把矿产安全上升到国家战略。《中国科学院院刊》基于自身“国家科学思想库核心媒体”的定位，特策划组织“中国战略性关键矿产资源安全研究”专题，聚焦于如何判断未来全球战略性关键矿产资源竞争格局，如何评价我国供应链安全，以及如何构建全球治理体系等国际新形势下亟待回答的关键科学问题，以期为实现我国中长期矿产资源安全提供战略支撑。本专题由中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心首席科学家、中国地质调查局科技咨询委员会副主任王安建教授，《中国科学院院刊》青年编委、中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心代涛研究员，《中国科学院院刊》青年编委、北京大学城市与环境学院刘刚教授共同指导推进。

引用格式：王安建, 袁小晶. 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1550-1559.
Wang A J, Yuan X J. The security of China's strategic and critical minerals under the background of great power competition. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1550-1559. (in Chinese)

大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考

王安建* 袁小晶

1 中国地质科学院 全球矿产资源战略研究中心 北京 100037
2 中国地质科学院矿产资源研究所 北京 100037

摘要 战略性关键矿产是对国家经济发展至关重要、对战略新兴产业不可或缺，同时又被打上地缘政治烙印的一类矿产资源。战略性关键矿产的种类因国家经济发展阶段、经济结构和全球化产业分工不同而呈现某些时空演变规律。特别是21世纪以来，伴随着信息技术、人工智能和可再生能源等战略新兴产业快速发展，战略性关键矿产内涵不断延伸并与产业链密切衔接，彰显了其重要地位和安全意义。中国、美国和欧盟战略性关键矿产种类高度重叠，美西方国家正在试图构建独立于中国之外的关键矿产供应链，因此中国需要制定相关战略并做出科学合理的应对。

关键词 关键矿产，产业链，时空演变，潜在风险，对策建议

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220817001

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金委员会基础科学中心项目（72088101），国家自然科学基金重大研究计划集成项目（92162321），国家自然科学基金重大项目（71991480）

修改稿收到日期：2022年10月14日

21世纪以来，“关键矿产”（critical minerals）高频出现在许多西方国家政府和智库报告中。美国、英国、欧盟、经济合作与发展组织、日本、加拿大和澳大利亚等国家、地区和机构相继公布或更新了相关关键矿产目录。特别是美国，其能源部、内政部、国防部、商务部和白宫预算办公室等多部门、多次涉猎关键矿产相关战略和政策——在不足6年的时间里，特朗普和拜登先后4次签发总统令，强化关键矿产及其供应链和产业链安全问题，由此可见关键矿产的价值和意义非同小可。

战略性关键矿产是对国家经济发展至关重要、对战略新兴产业不可或缺，同时又被赋予地缘政治色彩的一类矿产资源。了解关键矿产应用及其领域，追溯关键矿产种类的时空变化，分析各国之间关键矿产的竞争关系，探讨中国关键矿产供应链和产业链安全需要关注的问题，对于制定中国战略性关键矿产战略，支撑国家现代化建设意义重大。

1 战略性关键矿产的时空演变

“战略性关键矿产”词源于英国和“战略性关键矿产”词源于英国，之后又于20世纪早期出现在美国的《战略性和危机性原材料储备法》（*Strategic and Critical Materials Stock Piling Act*）中。此后，“战略性关键原材料”（strategic and critical materials）和“关键矿产”（critical minerals或critical raw materials）经常并行出现在表达相同内涵的文件和报告中，沿用至今。关键矿产或战略性关键原材料相关目录包含各类元素和矿物，后者还包括天然橡胶等非矿产类原材料。鉴于国内惯用的“战略性矿产”有别于西方国家关键矿产的定义，本文仍使用“战略性关键矿产”讨论相关问题。

战略性关键矿产时空演化具有特定规律。时间上，迄今已经被各国和国际组织列为战略性关键矿产的元素超过68种，特定矿物超过10种（图1）。

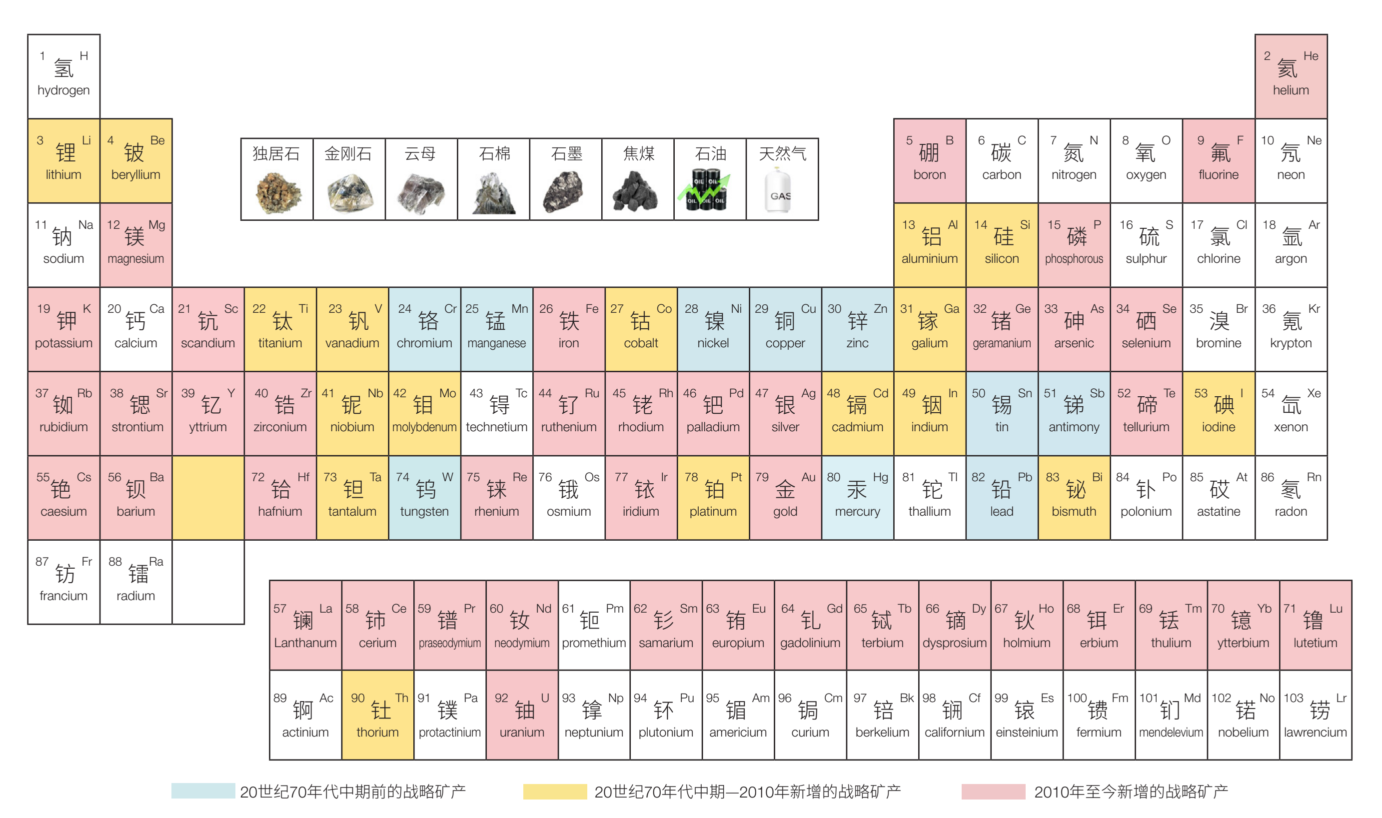


图1 不同时期被各国和国际组织列为关键矿产的种类

Figure 1 Critical minerals listed by countries and international organizations at different times

其中，20世纪70年代中期之前10种，之后增加了稀土、铟、镓、锂等总数达28种；21世纪初期，伴随战略新兴产业快速发展，铂族和镧系稀土元素应用领域不断扩大，关键矿产和特定矿物总数已接近80种。空间上，与资源消费国不同，资源供应国更注重于自身资源禀赋、市场规模及未来需求趋势。因此，处于不同经济发展阶段及不同类型国家，其战略性关键矿产资源种类有所差异（图2）。

（1）20世纪70年代中期之前，发达国家在经历两次世界大战之后，相继进入战后重建和集中完成工业化过程。这一时期关键矿产被界定为对国防安全至关重要并且存在较大供应风险的元素或矿物。被列入关键矿产目录的10种矿产，基本反映了美欧等发达经济体自身资源禀赋不佳、供应存在较大风险和满足国防军工产业发展原材料安全供应的基本考量（图2）。

（2）20世纪70年代中期—21世纪初，西方国家以大宗矿产大量快速消费为特征的工业化接近尾声，发达经济体开始进入后工业化过程，传统产业持续升级、转型并伴随着产业递级转移。这一时期关键矿产界定除了考虑国防安全之外，开始拓展到支撑经济发展的高新技术产业原材料供应安全，界定原则仍然考虑其供应风险较大的矿种。稀土、铌、钽、铍、钍、铋、镉、铝、铟、镓、钛、锂、钒、硅及天然石墨的加入，体现了发达经济体进入后工业化发展阶段开始聚焦于产业升级和转型需要解决的关键矿产资源供应安全问题。

（3）21世纪初期以来，全球信息技术、人工智能、可再生能源等战略新兴产业发展繁花似锦，方兴未艾。伴随着中国的快速崛起，大国竞争初露端倪，支撑高新技术发展的原材料安全供应再度引发各方关注，战略新兴产业关键矿产供应链和产业链安全成为发达经济体高度关切的焦点。此时，关键矿产界定原则开始综合考量国防安全、经济重要性和战略新兴产业发展资源需求，以及常态化的供应风险问题。这一时期，铜、铅、钍、钼、金刚石和钾盐等被陆续从关键矿产目录中剔除，增加了焦煤、镁、铀、砷、锗、铷、铯、锶、钡、锆、铼、铪、碲和氦，铂族金属拓展到5种，稀土元素拓展到16种——全球关键矿产总量超过了60种，几乎涵盖了所有稀有、稀散、稀土和稀贵元素。

（4）有别于重要资源消费国，继美国和欧盟强化关键矿产安全问题之后，加拿大和澳大利亚作为资源供应大国，其关键矿产界定更关注自身资源禀赋，注重经济重要性、低碳经济转型、市场规模及未来增长趋势，目标是为盟国提供可持续的矿物质来源。澳大利亚根据资源潜力将关键矿产分为3类，除增加了硒之外，与美欧关键矿产目录基本雷同。加拿大确立的31种关键矿产基本涵盖于欧美关键矿产目录之中。

（5）与西方发达经济体不同，中国的战略性矿产界定更注重其经济重要性和产业发展支撑性，而对供应风险考虑有限。例如，稀土、钨、锡、钼、锑、铟、锗、镓、磷和萤石、石墨等无供应风险的优势矿产，与石油、天然气、铀、铁、铬、铜、锂、钴、镍、铍、铌、钽、锆等供应风险较大的短缺矿产一起均被列入战略性矿产（图2）。石油、天然气、煤炭、铁、铜、铝和磷等大宗矿产资源被列为战略性矿产，反映了目前这些矿产对中国经济发展仍然发挥着关键支撑作用。也正是由于中国正处于工业化后期向后工业化，即向现代化建设跨越的特殊发展阶段，战略新兴产业的快速崛起使中国战略性矿产的种类和数量与西方国家比较有过之而无不及。

鉴于中国战略性关键矿产界定原则不同于美国、英国、加拿大、澳大利亚和欧盟等国家和地区，中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心仍将中国战略性矿产统称为“战略性关键矿产”，这既体现了与西方发达经济体的差异，也反映了相似可比较的内涵。

关键矿产种类和数量随着时间和空间的变化，反

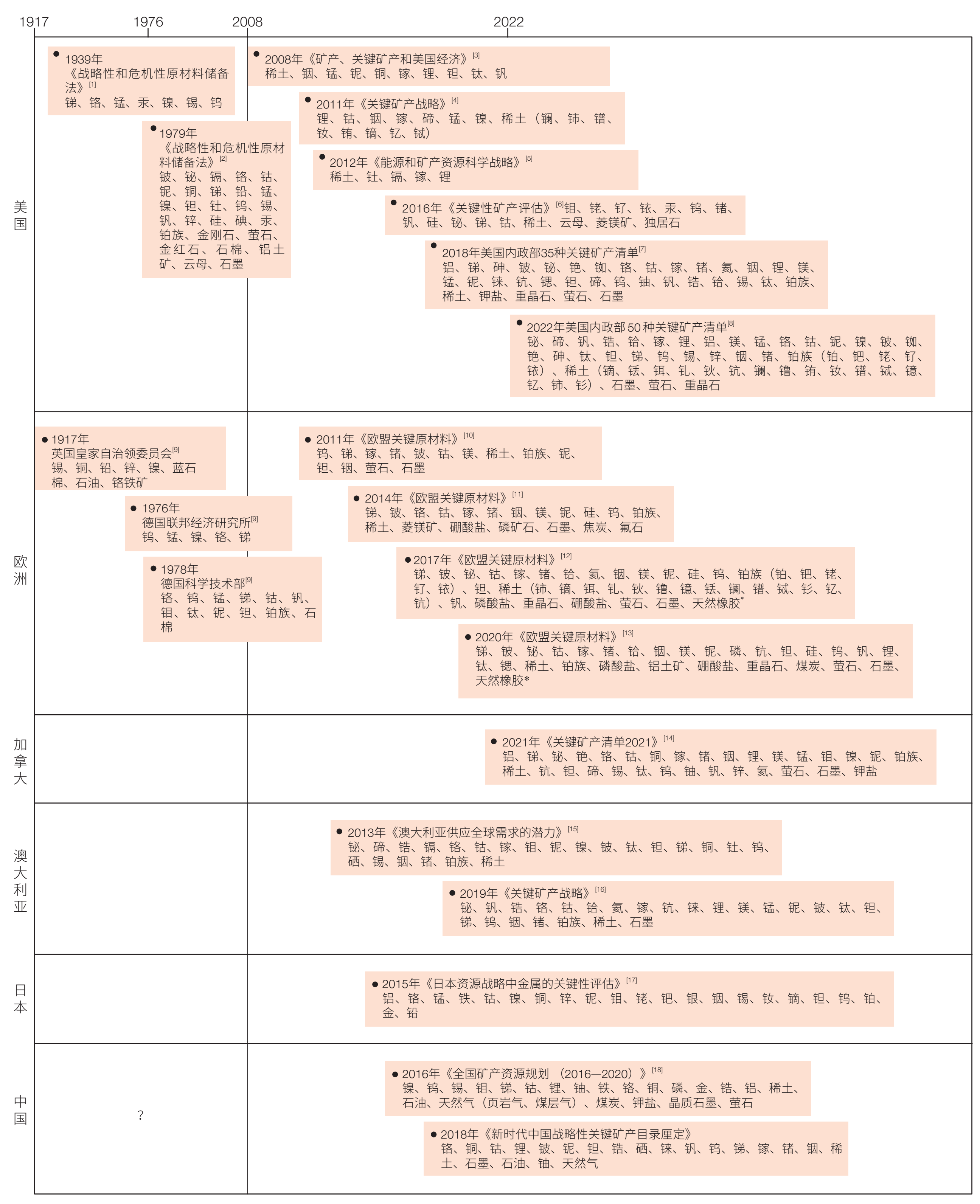


图 2 主要经济体的战略性关键矿产种类时空演变

Figure 2 Spatial and temporal evolution of critical mineral types in major economies

*天然橡胶为原材料，非矿产资源；？表示中国在2008年以前未厘定过战略性关键矿产目录；《新时代中国战略性关键矿产目录厘定》为王安建所著的未公开发表的学术报告

*Natural rubber as the raw material, not mineral resource; ? Indicates that China had not defined the strategic and critical minerals inventory before 2008; *Inventorying China's Strategic and Critical Minerals in the New Era* is an unpublished academic report by Wang Anjian

映了一个国家不同经济发展阶段、不同产业结构；不同种类矿产资源在经济建设中作用和地位的差异，也反映了全球化国际产业分工，以及地缘政治格局演变过程中各国为寻求资源安全的诉求和目标的不同。

2 战略性关键矿产内涵的延伸与战略新兴产业链

战略性关键矿产种类和数量爆发式增长彰显了21世纪以来航天航空、信息技术、人工智能、新能源、生物制药等战略新兴产业高速发展，以及数字经济和高端制造对矿产资源提出的新需求。关键矿产内涵正在进一步延伸，某些战略性关键矿产也被称之为“高新技术矿产”“清洁能源矿产”或“数字经济矿产”等。欧盟系统梳理了自身3支重要产业（领域）、9项核心技术和超过25种（类）关键矿产物质流动关系和供应风险（图3），将核心技术与关键矿产有机关联值得高度关注。

当前，我国正处于与发达经济体20世纪70年代中期伴随工业化结束，产业升级、转型的关键矿产需求快速增长相似的发展时期，同时叠加了21世纪以来新能源、信息技术、航天航空等战略新兴产业迅速发展对关键矿产种类和数量的依赖性需求。显然，我国战略性关键矿产大量快速消费将不可避免。以《中国制造2025》为例，我国已经投入超过30种战略性关键矿产支撑这一计划的实施（图4）——如果把铂族和镧系稀土元素展开，我国战略性关键矿产超过50种。战略性关键矿产关系到我国庞大产业链安全和国计民生大计，需要予以高度关注。

3 中美欧战略性关键矿产高度重合

战略性关键矿产资源具有空间分布不均衡、时间尺度不可再生、丰度维度稀缺和物性维度难以替代“四重属性”。受地质规律控制，任何国家或经济体战略性关键矿产都不可能应有尽有或完全满足需求；特别是许多重要战略性关键矿产系地壳中痕量存在的稀有、稀散和稀土元素，不仅稀缺而且具有难以替代

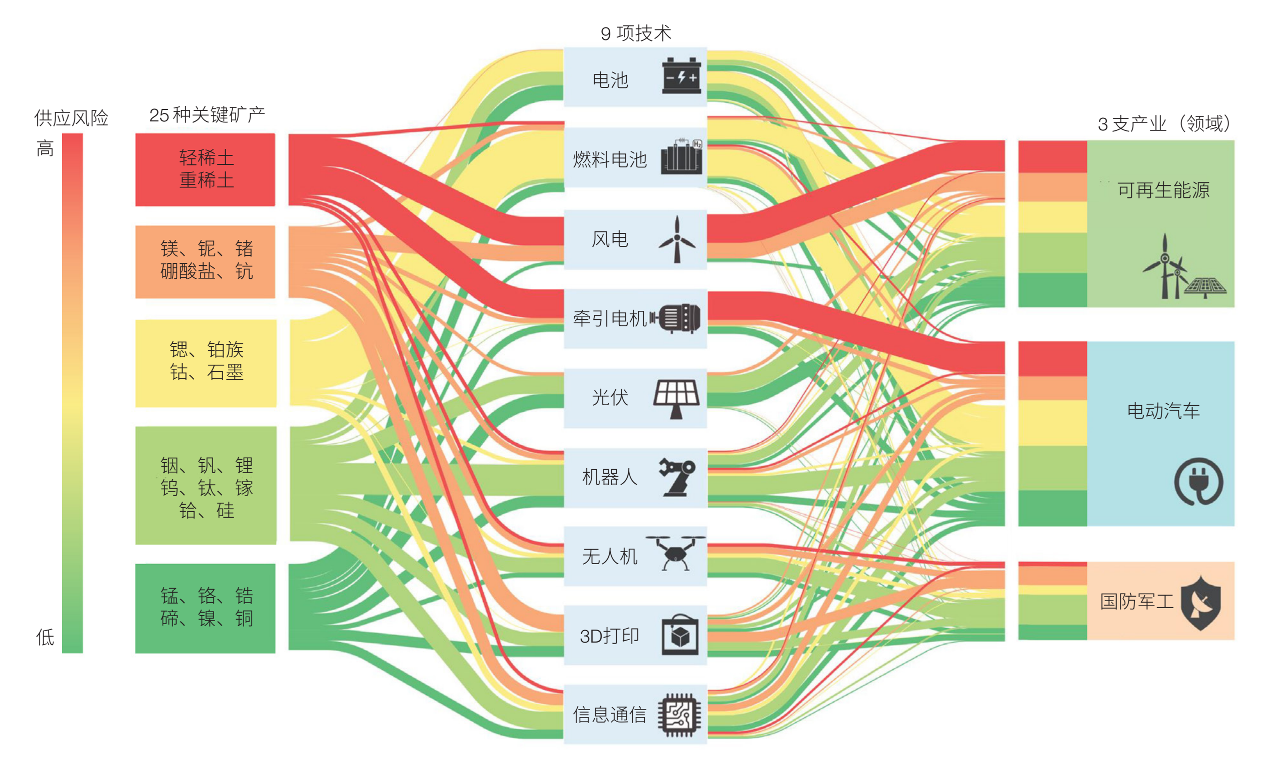


图3　欧盟系统梳理的关键矿产-核心技术-新兴产业[19]

Figure 3　Critical minerals - core technologies - emerging industries for EU system sorting[19]

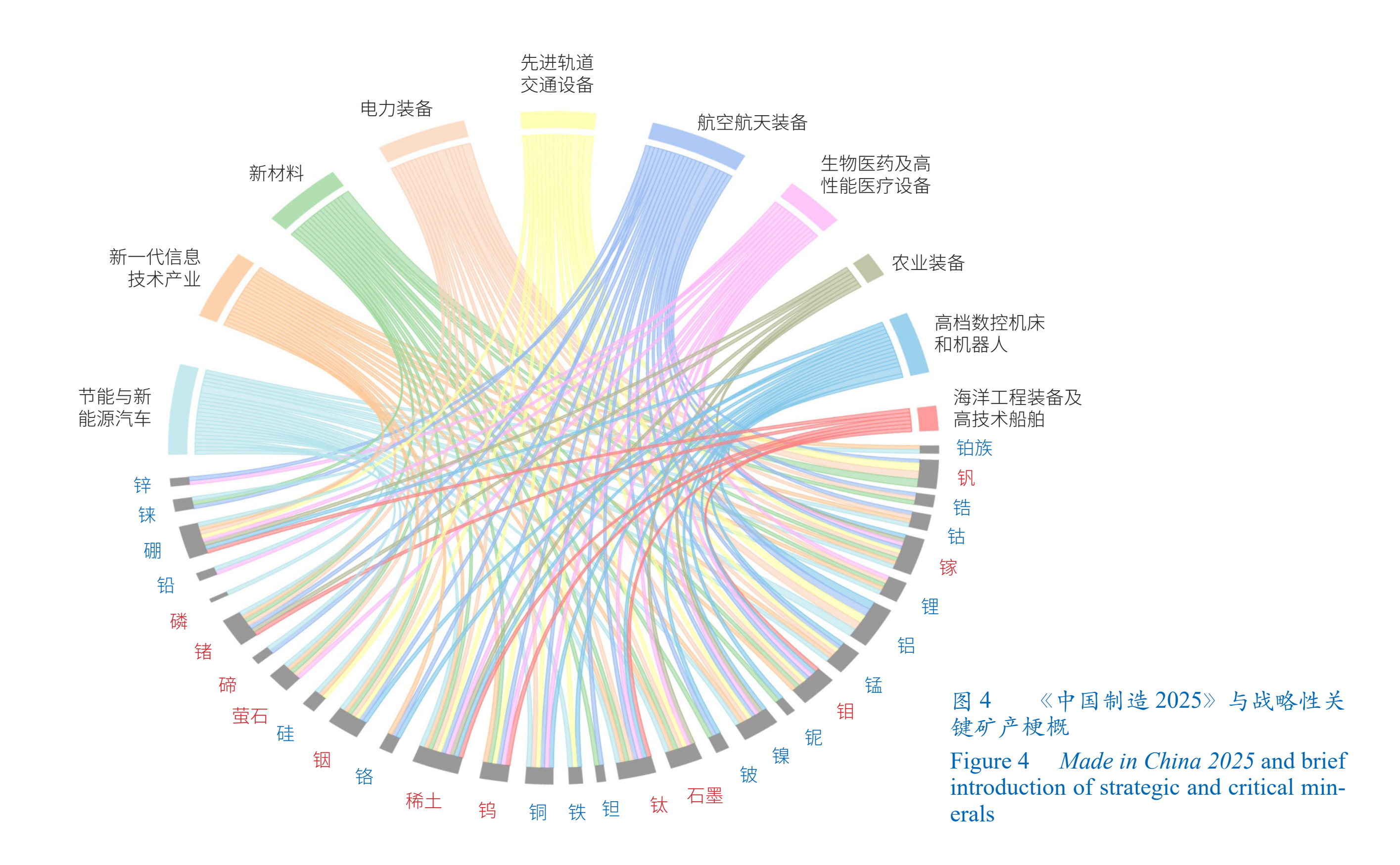


图 4 《中国制造 2025》与战略性关键矿产梗概

Figure 4 *Made in China 2025* and brief introduction of strategic and critical minerals

的功能和作用。这些元素形成可供开发利用的“资源”也往往需要浓缩 2—5 个数量级，历经几百万年甚至几千万年时间；其中一些元素无法形成独立的矿床，甚至无法形成独立的矿物，它们多以共生、伴生甚至于吸附状态赋存于不同的地质体中。战略性关键矿产的“四重属性”及其在国防军工、高端制造及新兴战略产业发展中的不可或缺性，使之成为当今世界大国竞争和博弈的重要焦点。

资料表明，中国、美国、欧盟战略性关键矿产种类重合度较高（图 5）。① 中国与美国有 21 种（类）战略性关键矿产重合。其中，铬、锂、钴、镍、铍、锆、铌、钽和锰等 9 种是中国短缺且供应风险较大的矿产，存在较大的潜在竞争和被“卡脖子”风险。② 中国与欧盟有 17 种（类）战略性关键矿产重合。其中，锂、钴、铌、钽、铍 5 种战略性关键矿产是我国供应风险较大矿种。③ 中国、美国、欧盟重合的战略性关键矿产 16 种，如果把镧系元素即稀土元素展开，重合的矿产种类达 30 种，其中不乏中国严重短缺矿种，未来三者或存在潜在竞争关系。

美国地调局 Gulley 等[20]曾撰文指出中美双方在铌、钽、铬、锰、钛、铼、钍、铂、钯、锂和锆 11 种关键矿产对外依存均超过 50%，来源地重叠度较高，潜在竞争风险犹存。事实上，美国一直试图构建独立于中国的关键矿产供应链：美国连续两任总统在不足 6 年的时间里 4 次发布总统令，强化关键矿产供应安全问题；相继出台《评估和加强美国制造业和国防工业基础与供应链弹性》①、《确保关键矿产实现安全可靠供应之国家战略》②、《应对依赖国外竞争

① White House. Executive Order 13806: Assessing and strengthening the manufacturing and defense industrial base and supply chain resiliency of the United States. (2017-07-21). https://www.federalregister.gov/documents/2017/07/26/2017-15860/assessing-and-strengthening-the-manufacturing-and-defense-industrial-base-and-supply-chain.

② White House. Executive Order 13817: A federal strategy to ensure secure and reliable supplies of critical minerals. (2017-12-20). https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899/a-federal-strategy-to-ensure-secure-and-reliable-supplies-of-critical-minerals.

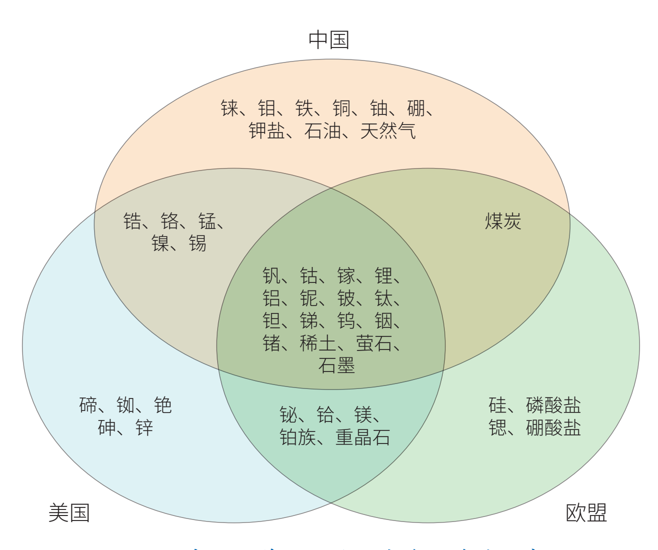


图 5　中国、美国、欧盟战略性关键矿产

Figure 5　Strategic and critical minerals in China, US and EU 33 strategic minerals of China are obtained from confidential data

中国战略性关键矿产资料源自：王安建“新时代中国关键矿产目录厘定与安全评估”主题报告

Information on strategic and critical minerals in China is quoted from Wang Anjian's report "Inventorying China's Strategic and Critical Minerals in the New Era and Security Assessment"

对手对国内关键矿产供应链的威胁，支持国内采矿和加工行业》③、《美国供应链行政令》④、《构建弹性供应链，重振美国制造业及促进广泛增长：应对14 017号总统令的100天审查》[21]等近10份重要报告；通过签订“能源资源治理倡议”⑤、“矿产安全伙伴关系”（MSP）⑥等组建供应链和产业链联盟，搞“小圈子”，阻滞全球化进程，对全球关键矿产供应安全造成了负面影响。

4 思考与建议

围绕战略性关键矿产供应链和产业链安全问题，不同国家给出了不同的解读。战略性关键矿产是支撑核心技术和战略新兴产业发展的关键原材料，是未来高端制造和数字经济的物质基础。各国根据自身需求制定关键矿产清单无可厚非。然而，美西方国家在确定各自关键矿产清单的同时，不断组建各种资源联盟或供应链联盟，把对中国战略性关键矿产依赖作为其供应脆弱性分析的焦点，放大风险来源，其地缘政治意味浓厚。

大国竞争是当今世界的主旋律。特别是俄罗斯对乌克兰发起特别军事行动和美西方国家对俄罗斯发起全面“绞杀式”制裁，使本已纷乱复杂的世界地缘政治格局趋于更加动荡，愈演愈烈的阵营化、集团化和供应链本土化的“去全球化”使关键矿产问题复杂化。未来国际环境中的不确定性正在增加，中国发展的外部环境或将趋于更加复杂和更加严峻，因此更需要高度关注中国战略性关键矿产安全问题。

（1）科学厘定我国关键矿产目录。我国正处于现代化建设的关键发展阶段，矿产资源消费不仅总量大、品种多、领域广，而且不同种类矿产开始进入此消彼长、波次递进的增速转换期。因此，需要结合目前的国情进一步核定我国关键矿产的种类。目前，我国给出的战略性矿产概念不同于欧美的关键矿产。如果将关键矿产供应风险纳入厘定标准，则我国战略性关键矿产中的紧缺矿产可定义为“关键矿产”。因此，需要综合考虑我国的资源禀赋，境外资源供应集中度、来源国稳定性、地缘政治取向、输运通道安全等因素，合理给出我国关键矿产的界定原则、分类，科学厘定我国战略性关键矿产或关键矿产目录。

（2）强化战略性关键矿产供应风险与产业链一

③ White House. Executive Order 13953: Addressing the threat to the domestic supply chain from reliance on critical minerals from foreign adversaries and supporting the domestic mining and processing industries. (2020-09-30). https://www.federalregister.gov/documents/2020/10/05/2020-22064/addressing-the-threat-to-the-domestic-supply-chain-from-reliance-on-critical-minerals-from-foreign.

④ White House. Executive Order 14017: America's Supply Chains. (2021-03-01). https://www.federalregister.gov/documents/2021/03/01/2021-04280/americas-supply-chains.

⑤ White House. No. HR2785: Energy Resource Governance Initiative Act of 2021. (2021-05-19). https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/2785/text?q=%7B%22search%22%3A%5B%222785%22%2C%222785%22%5D%7D&r=6&s=1.

⑥ U.S. Department of State. Minerals Security Partnership. (2022-06-14). https://www.state.gov/minerals-security-partnership/.

体化研究。将全产业链各环节核心需求与战略性关键矿产供应链风险分析密切关联是提出解决中国资源安全方案的重要路径。要努力改变以往“多关注上游供应链，忽略中下游产业链”的思维模式，着重分析关键矿产从找矿、勘查、采矿、选矿、冶炼、加工、材料研发、产品制造、资源回收全链条各个环节的薄弱点和脆弱点，分析战略性关键矿产供应风险来源、类型、等级，特别是要查明产业链中下游超高纯材料、核心部件、关键产品和重要装备制造等各环节的资源约束、技术瓶颈和工艺难点，建立战略性关键矿产供应链、产业链跟踪、监测、分析、评价、预警和应对机制，提升我国应对各种复杂形势下的资源安全保障能力。

（3）加大国内紧缺矿产勘查力度，提升我国战略性关键矿产保障能力和国际竞争能力。优化相关政策、简化审批程序、推动国内紧缺关键矿产勘查和开发是美国、欧盟等发达国家和地区解决关键矿产问题的通行做法，也是一项行之有效的措施。与之比较，受环境保护和碳减排等政策束缚，当前我国矿产资源勘查、开发相关政策正在收紧，国内矿业持续萎缩，勘查投入大幅下滑，一些重要矿产资源储量出现零增长或负增长，我国庞大工业体系的原材料安全保障令人担忧。持续加强我国紧缺战略性关键矿产找矿、勘查力度，不断提升科技支撑能力，强化我国优势战略性关键矿产采矿、选矿和冶炼领域的技术优势，对于提升我国战略性关键矿产保障能力和国际竞争能力至关重要。

（4）加强资源外交，构建全球战略性关键矿产资源安全命运共同体。通过开放、合作和互惠贸易实现各国所需关键矿产安全稳定供应是经济全球化以来给人类带来的重要福祉之一。应继续强化外交努力，联合智利、巴西、秘鲁、印尼、菲律宾、南非、刚果（金）、俄罗斯以及中东国家等资源国，邀请加拿大、澳大利亚等西方资源大国参与，形成关键矿产互利互惠和互为安全的供应机制。拒绝“脱钩”、避免“脱钩”、紧密“挂钩”，形成命运共同体也许是解决未来各国关键矿产安全最经济也是最佳的途径。

参考文献

1 Committee on Military Affairs. Strategic and Critical Raw Materials. Washington DC: US GPO, 1939.

2 US Congress. Strategic and Critical Materials Transaction Authorization Act of 1979. Washington DC: US Congress, 1979.

3 National Research Council of the National Academies. Minerals, Critical Minerals, and the US Economy. Washington DC: The National Academies Press, 2008.

4 US Department of Energy. Critical Mineral Strategy. Washington DC: US Department of Energy, 2011.

5 US Geological Survey. Energy and Minerals Science Strategy—Public Review Release. Washington DC: US Geological Survey, 2012.

6 National Science and Technology Council. Assessment of Critical Minerals—Screening Methodology and Initial Application. Washington DC: National Science and Technology Council, 2016.

7 US Department of the Interior. Draft Critical Mineral List—Summary of Methodology and Background Information—U.S. Geological Survey Technical Input Document in Response to Secretarial Order No. 3359. Washington DC: US Department of the Interior, 2018.

8 US Geological Survey. 2022 Final List of Critical Minerals. Washington DC: US Geological Survey, Department of the Interior, 2022.

9 王家枢, 张新安, 张小枫. 矿产资源与国家安全. 北京: 地质出版社, 2000.

Wang J S, Zhang X A, Zhang X F. Mineral Resources and National Security. Beijing: Geology Press, 2000. (in Chinese)

10 European Commission. Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials. Brussels: European Commission, 2011.

11 European Commission. On the Review of the List of Critical

Raw Materials for the EU and the Implementation of the Raw Materials Initiative. Brussels: European Commission, 2014.

12 European Commission. Study on the Review of the List of Critical Raw Materials—Critical Raw Materials Factsheets. Brussels: European Commission, 2017.

13 European Commission. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path Towards Greater Security and Sustainability. Brussels: European Commission, 2020.

14 Government of Canada. Canada's Critical Minerals List. Canada: Natural Resources Canada, 2021.

15 Skirrow R, Huston D L, Mernagh T P, et al. Critical Commodities for a High-tech World: Australia's Potential to Supply Global Demand. Canberra: Geoscience Australia, 2013.

16 Australian Government. Australia's Critical Minerals Prospectus. Canberra: Australia Trade and Investment Commission, 2019.

17 Hatayama H, Tahara K. Criticality assessment of metals for Japan's resource strategy. Materials Transactions, 2015, 56(2): 229-235.

18 国土资源部. 全国矿产资源规划（2016—2020年）. (2016-11-02)[2022-08-01]. http://mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324927.html.

Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. National Mineral Resources Planning (2016-2020). (2016-11-02)[2022-08-01]. https://www.cgs.gov.cn/tzgg/tzgg/201612/t20161206_418714.html. (in Chinese)

19 European Commission. Critical Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU—A Foresight Study. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

20 Gulley A L, Nassar N T, Xun S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies. PNAS, 2018, 115(16): 4111-4115.

21 White House. 100-Day Reviews under Executive Order 14017: Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-based Growth. Washington DC: White House, 2021.

The Security of China's Strategic and Critical Minerals under the Background of Great Power Competition

WANG Anjian* YUAN Xiaojing

（1 Global Mineral Resources Strategy Research Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China）

Abstract Strategic and critical minerals are a type of resource that is essential to the country's economic development, indispensable to strategic emerging industries, and closely related to geopolitics. The types of strategic and critical minerals show some laws of spatial-temporal evolution due to the different stages of national economic development, economic structure and global industrial division of labor. Especially since the new century, with the rapid development of strategic emerging industries such as information technology, artificial intelligence and renewable energy, the connotation of strategic critical minerals has been continuously extended and closely connected with the industrial chain, highlighting its important position and security significance. China, the United States and the European Union have a high degree of overlap in the types of strategic critical minerals, and the United States and Western countries are trying to build a critical mineral supply chain independent of China. Hence, it requires China to formulate relevant strategies and make scientific and reasonable responses.

Keywords critical mineral, industrial chain, spatial-temporal evolution, potential risks, policy implications

*Corresponding author



王安建　中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心首席科学家。国际地科联“为子孙后代寻找资源倡议”（Resourcing Future Generation）发起人之一，中国地质调查局科技咨询委员会副主任。长期从事经济地质、资源经济与资源战略研究，发现能源资源消费与经济发展的S形规律，创建了能源资源消费增长的极限理论。出版专著4部，发表论文200余篇。E-mail: ajwang@cags.ac.cn

WANG Anjian　Chief Scientist of the Global Mineral Resources Strategy Research Centre of the Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS), one of the founders of the IUGS Resourcing Future Generation (RFG) initiative, and deputy director of Science and Technology Advisory Committee of China Geological Survey (CGS). He has long been engaged in research on economic geology, resource economics and strategy, discovered the S-shaped law of energy and resource consumption and economic development, and created the theory of “limits to growth” in energy and resource consumption. He has published four monographs and over 200 papers. E-mail: ajwang@cags.ac.cn

■责任编辑：岳凌生